

Simetries trencades: el Nobel de física del 2008

Antoni Méndez

Departament de Física i Institut de Física d'Altes Energies (IFAE), Universitat Autònoma de Barcelona

El darrer premi Nobel de física s'ha atorgat a M. Kobayashi i T. Maskawa i Y. Nambu per les seves contribucions a la comprensió dels components més petits de la matèria, els "maons" a partir dels quals s'edifica tot el que hi ha a l'Univers. La matemàtica i les simetries hi han jugat un paper fonamental.

Paraules clau: premi Nobel de física, simetries, components de la matèria, partícules

Com és possible
que existeixi alguna cosa?

Sabem que l'Univers es va originar en una Gran Explosió, l'anomenat *Big Bang*. També sabem que la radiació es pot materialitzar en parelles de partícules i antipartícules... parelles que es poden tornar a aniquilar i convertir-se de nou en radiació.

Aleshores, si de l'energia alliberada en el Big Bang es van produir parelles de partícules i antipartícules... per què no es van aniquilar totes elles? Com és possible que pràcticament tot el contingut material de l'Univers que observem sigui de matèria? Què ha passat amb l'antimatèria que hi falta?

En definitiva: com és que ha arribat a existir alguna cosa material, en comptes de quedar l'Univers reduït a radiació pura, completament buit de matèria, com sembla que hauria d'haver succeït?

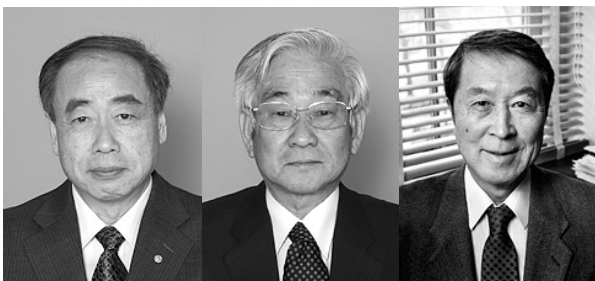


Figura 1. D'esquerra a dreta, els japonesos Makoto Kobayashi i Toshihide Maskawa i l'estatunidenc Yoichiro Nambu, guardonats amb el premi Nobel de Física del 2008. (Font: nobelprize.org).

El premi Nobel del 2008 ha estat concedit a tres investigadors que anys enrere van fer algunes contribucions clau per aclarir aquestes contradiccions. Es tracta de M. Kobayashi i T. Maskawa i Y. Nambu (fig. 1).

Per comprendre les seves aportacions ens situarem en el context de l'època.

De què és feta la matèria?

Anem, doncs, a principis dels anys 70. El que la comunitat científica acceptava aleshores sobre la composició de la matèria era, a grans trets, que els constituents últims de la matèria eren els electrons i els quarks (fig. 2).

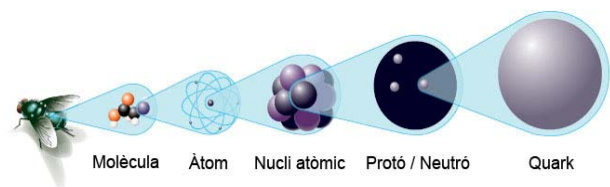


Figura 2. Els quarks són els constituents últims del nucli atòmic. Juntament amb els electrons formen els àtoms i els objectes. (Font: nobelprize.org).

Més exactament, es considerava que els components de la matèria eren (fig. 3) els leptons (uns dels quals eren els electrons) i els quarks (cadascun d'ells en tres varietats o "colors"). A més a

més, per cada partícula hi havia la corresponent antipartícula. Les partícules s'agrupaven en dues famílies de propietats molt semblants (per exemple, la suma de la càrrega dels vuit membres de cada família és zero), excepte que els membres de la segona família eren més pesats que els de la primera.

| | Primera família | Segona família | |
|---------|-------------------|----------------|------|
| leptons | neutrí electrònic | neutrí muònic | 0 |
| | electró | muó | -1 |
| quarks | u u u | c c c | +2/3 |
| | d d d | s s s | -1/3 |

Figura 3. Es considerava que la matèria estava formada per leptons i quarks de diversos tipus, agrupats en dues famílies de partícules. (Sobre fons blau, valor de la corresponent càrrega elèctrica).

Segons aquesta teoria, un protó està format per tres quarks (*uud*). La suma de les seves càrregues constitueix, efectivament, la càrrega del protó:

$$2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$$

mentre que un neutró seria també una combinació de tres quarks (*udd*), fent que la seva càrrega sigui nul·la:

$$2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$$

Però van començar a sorgir una sèrie de dificultats.

Violació de simetries

En la nostra vida quotidiana ens és impossible distingir entre fenòmens que es produeixen en el món i la seva imatge en un mirall (fig. 4). Però ja des del 1956 se sabia que les desintegracions beta no respecten la simetria del mirall o *simetria de la paritat (P)*; un fenomen anomenat "*violació de la paritat*" o "*violació de P*".

Recordem que les forces de la naturalesa es poden agrupar en quatre tipus (fig. 5). D'elles, només la interacció dèbil violava la simetria P.



Figura 4. Quan es respecta la simetria P és impossible distingir el món real de la seva imatge especular, ja que compleixen les mateixes lleis físiques.

| Partícules que transmeten la força | Exemples |
|--|---------------------|
| Electromagnètica Fotons ($m = 0$) | Àtoms, molècules |
| Interacció forta Gluons ($m = 0$) | Nucli atòmic |
| Interacció dèbil W^+, W^-, Z^0 ($m \neq 0$) | Desintegració beta |

Figura 5. De les interaccions fonamentals de l'Univers (deixant de banda la gravitatòria, irrellevant a escala atòmica) es mostren les partícules que transmeten cada interacció, si la seva massa és nul·la o no i alguns exemples d'estructures o fenòmens on hi juguen un paper determinant.

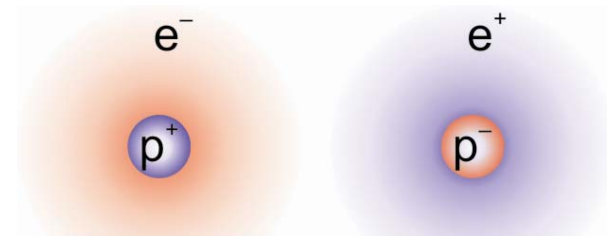


Figura 6. Àtom d'hidrogen (esquerra) i àtom d'antihidrogen (dreta) format, aquest, per un antiprotó, negatiu, i un positró o antielectró positiu. Ambdós obeeixen les mateixes lleis físiques: un exemple de simetria de la càrrega o simetria C.

Quan es considera la matèria i l'antimatèria passa una cosa semblant. Igual que existeixen àtoms d'hidrogen és perfectament possible arribar a tenir àtoms d'antihidrogen (fig. 6), fita actualment ja aconseguida experimentalment. Les lleis de la física semblaven idèntiques en un món de matèria o en un d'antimatèria.

Però, de nou, es descobrí que les interaccions dèbils violaven aquesta *simetria de càrrega* o *simetria C*.

Malgrat tot, va semblar que les coses es començaven a endreçar quan es descobrí que les interaccions dèbils, tot i violar les simetries P i C, sí que respectaven l'operació combinada de totes dues, l'anomenada simetria CP, que consisteix en invertir tant la paritat com les càrregues.

Però de nou, les dades van venir a complicar les coses: la interacció feble també violava la simetria CP en una proporció de casos molt petita, dos entre mil, un descobriment fet l'any 1963, que el 1980 suposà el premi Nobel de física a Cronin i Fitch (fig. 7).



Figura 7. J.W. Cronin (esquerra) i V.L. Fitch, premis Nobel de física el 1980 pel seu descobriment de la violació de la simetria CP. (Font: nobelprize.org).

En canvi, permetia començar a solucionar un problema important: aquesta violació explicava per fi una part del predomini de la matèria sobre l'antimatèria en l'origen de l'Univers.

Tots aquests descobriments experimentals i teòrics van posar en entredit la teoria fins aleshores vigent. Fou llavors quan, el 1972, Kobayashi i Maskawa, veient la impossibilitat matemàtica de fer compatible la violació de la simetria CP amb les matrius 2x2 que utilitzava la teoria amb dues famílies de partícules elementals, van suggerir la possibilitat de poder-ho explicar utilitzant una matriu 3x3, actualment anomenada de Kobayashi-Maskawa.

La conseqüència era que havia d'existir almenys una tercera família de partícules elementals (fig. 8).

| | Primera família | Segona família | Tercera família | |
|---------|-------------------|----------------|-----------------|------|
| leptons | neutrí electrònic | neutrí muònic | neutrí tauònic | 0 |
| | electró | muó | tauó | -1 |
| quarks | u u u | c c c | t t t | +2/3 |
| | d d d | s s s | b b b | -1/3 |

Figura 8. Les actuals tres famílies de partícules. (A la columna de la dreta, la seva càrrega elèctrica).

Efectivament, el 1976 es descobria el *tauó*, el 1978 el quark *b*. Des dels anys 90 ja se sap que hi ha tres tipus de neutrins. I va caldre esperar fins al 1995 per confirmar experimentalment l'existència del quark *t*.

Però encara quedaven dificultats per resoldre.

Conservar la simetria o trencar-la?

A la física les simetries són importants, no només per raons d'estètica:

- Estan íntimament lligades a les lleis de conservació
- De vegades és necessari que es respectin de forma exacta
- D'altres és necessari que es trenquin
- I finalment, en altres casos cal que siguin exactes i alhora trencades!

Posarem alguns exemples.

Exemple 1. Interacció electromagnètica

Que la interacció electromagnètica resulti invariant sota uns determinats tipus de transformacions (anomenades de *gauge*) té una sèrie de conseqüències importants: la càrrega elèctrica s'ha de conservar, la massa del fotó ha de ser zero i la teoria és renormalitzable (propietat matemàtica de la teoria que li dona poder predictiu al permetre realitzar càlculs d'alta precisió).

Totes aquestes prediccions són correctes.

Exemple 2. La interacció dèbil

També és invariable sota determinades transformacions de *gauge*, amb les següents conseqüències: les "càrregues" s'han de conservar, les masses del fotó, de Z^0 i de W^\pm han de ser zero, les

masses de leptons i quarks han de ser zero, no hi ha d'haver violació de CP, i la teoria és renormalitzable.

Però algunes d'aquestes previsions no són correctes: algunes "càrregues" (no elèctriques) no es conserven, les masses de Z^0 i W^\pm no són nul·les, les masses de leptons i quarks tampoc no són zero i hi ha violació de CP. La simetria *gauge* s'ha de trencar... però llavors la teoria resulta no renormalitzable.

Això ens aboca aparentment a un carreró sense sortida: si la simetria es trenca, la renormalitzabilitat es perd, però si no es trenca ens porta a prediccions incorrectes. Com es pot aconseguir que una teoria simètrica descriuï una realitat no simètrica?

Trencament espontani de la simetria

Fou justament el tercer guardonat amb el darrer premi Nobel de física, Nambu, qui va trobar la sortida d'aquest laberint. La seva resposta fou que la teoria hauria de permetre el *trencament espontani* de la simetria. Això té lloc quan en una teoria simètrica, el seu estat fonamental –el de mínima energia– no és únic. Ho il·lustrarem amb una analogia (fig. 9).

El conjunt de possibles estats fonamentals és simètric, però cadascun d'ells, individualment, ha perdut la simetria. És el que passa també en el sistema de la fig. 10.

Vegem-ne alguns exemples.

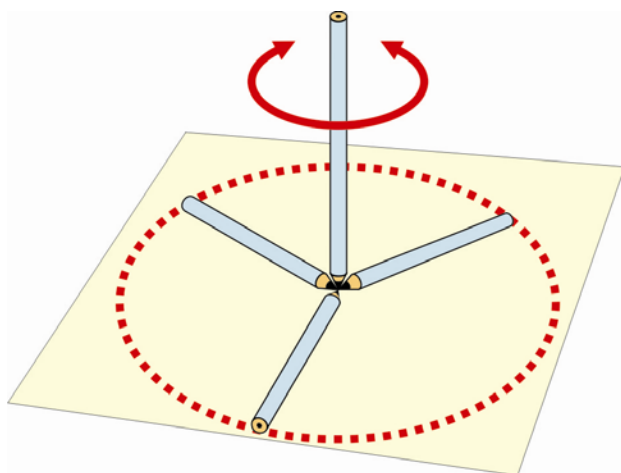


Figura 9. Sistema amb simetria de rotació en el seu estat inicial, quan el llapis està dret. Un cop ajagut (estat fonamental) ha perdut la simetria, però sí que la manté el conjunt dels estats fonamentals possibles, dels quals es mostren alguns exemples.

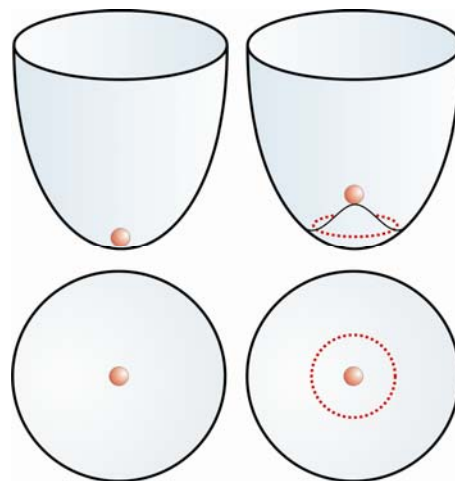


Figura 10. A l'esquerra, vista lateral i superior d'un sistema simètric. A la dreta, sistema inicialment simètric amb trencament espontani de la simetria.

Exemple 1. Material ferromagnètic

Per damunt de la temperatura crítica els camps magnètics atòmics estan desordenats. Es tracta d'una situació simètrica en que el material mostra isotropia: no hi ha cap direcció privilegiada (fig. 11).

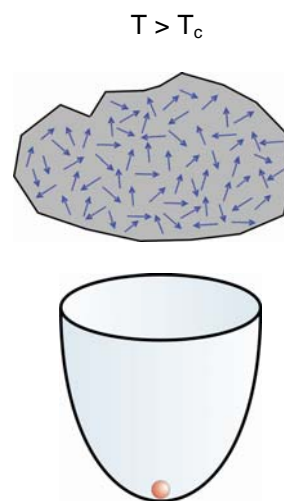


Figura 11. Simetria del sistema (material ferromagnètic) per damunt de la temperatura crítica. No hi ha dominis i la distribució de camps magnètics atòmics és simètrica (isòtropa).

En canvi, per sota de la temperatura crítica (fig. 12) es formen dominis dins de cadascun dels quals els camps magnètics atòmics s'alineen i es perd la isotropia: s'ha trencat espontàniament la simetria. El conjunt de dominis continua sent simètric, tot i que individualment cada domini no ho és.

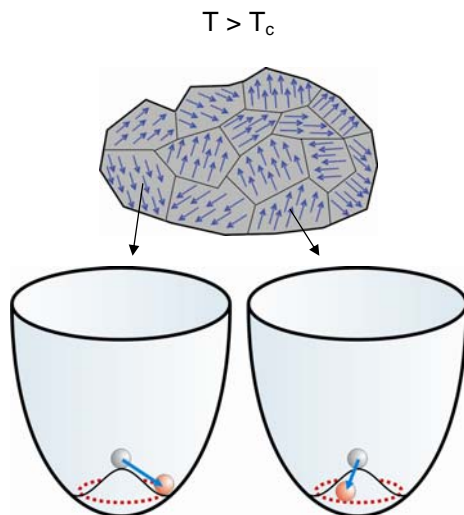


Figura 12. Al trencar-se espontàniament la simetria apareixen dominis magnètics. S'ha abandonat un estat simètric (isòtrop) per passar a estats no simètrics (no isòtrops), diferents en cada domini, però amb simetria conjunta.

Exemple 2. Interacció electrodèbil

Al produir-se el Big Bang s'està en una situació simètrica. Conseqüències d'aquesta simetria és que les càrregues es conserven, que les masses són zero, no hi ha violació CP i la teoria és renormalitzable.

Però després es produeix un trencament espontani de la simetria. A partir de llavors algunes càrregues no es conserven, les masses de les partícules transmissores de la força dèbil, Z^0 i W^\pm , ja no són nul·les, com tampoc ho són les masses de leptons i quarks, hi ha violació CP i la teoria encara és renormalitzable perquè només l'estat fonamental (no la teoria) ha perdut la simetria.



Figura 13. El físic britànic Peter Higgs, que el 1964 va proposar el marc teòric que, aplicat posteriorment a teories simètriques per a trencar espontàniament la simetria, preveu l'existència del bosó que ara du el seu nom. A la foto és davant del detector ATLAS del CERN, l'any 2008.

(Font: atlas.ch)

(ATLAS és un dels quatre detectors de l'accelerador LHC del CERN. L'Institut de Física d'Altes Energies –IFAE–, ubicat al campus de la UAB, ha construït una part d'aquest detector i participa en l'equip de científics que analitzaran les dades que s'obtinguin amb ell).

Però perquè tot això funcioni cal un ingredient essencial: l'anomenat *bosó de Higgs* (fig. 13).

El bosó de Higgs és una partícula que sabem que interactua amb altres partícules, però no en sabem la massa ni s'ha arribat a detectar mai. S'espera observar-lo al nou accelerador LHC del CERN.

Si es detecta serà molt interessant. I si no es detectés... potser encara seria més interessant!